

カーシェアリングの普及と自動車総台数の関係 に関する理論的研究

竹内 佑樹¹・松島 格也²・小林 潔司³

¹学生会員 京都大学 大学院工学研究科 都市社会学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: takeuchi.yuki.46v@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 京都大学准教授 大学院工学研究科 都市社会学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: matsushima.kakuya.7u@kyoto-u.ac.jp

³フェロー会員 京都大学教授 経営管理研究部 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: kobayashi.kiyoshi@kyoto-u.jp

カーシェアリングが他の交通手段と異なる点のひとつとして、サービスを取引するために発生する取引費用（待ち時間）がサービスとして提供されている車の台数とサービスの利用者数によって大きく変化することが挙げられる。この取引費用の存在は市場の形成に複雑な影響を与えていると考えられる。本研究では、カーシェアリングサービスの取引する際に発生する取引費用には規模の経済性が存在することを示す。サービスを利用する個人とサービスを提供する企業が共に戦略的行動をとる場合取引費用の規模の経済性により市場には外部経済が働く。外部経済が働く市場には複数の均衡解が存在する可能性があることが知られている。本研究では、カーシェアリングの市場において複数の均衡解が生じる可能性を理論的に分析を行う。また、複数均衡解が存在する市場において自動車台数に与える影響を分析を行い、自動車による社会問題の要因となる社会に存在する自動車総台数への影響を考察する。

Key Words : car sharing service, economies of scale, transaction cost

1. はじめに

カーシェアリングとは、ある自動車を複数の人々共同で使用するという自動車の保有形態である。カーシェアリングを行うことで個人が得られる直接的な利点は大きく分けて二種類存在する。ひとつは共通の目的地を持つ人々の移動を一回で行うことにより、複数回起こりうる OD 間の移動を削減し一回の利用に対する費用を減少させることができる。もう一つは自身が車を使用していない間その車を他人が使用することによって、車一台あたりの利用者数が増加し各々が負担する費用を低減させることができる。前者は家族や仕事仲間の間でカープールと呼ばれる形態で以前から行われてきた。後者は、車の位置や使用状況などの情報共有手段が発達した現在においてより効率的に行うことができるようになり、カーシェアリングをサービスとして提供する企業が出現するようになった。

また、カーシェアリングが広まることにより不要な自動車保有が減少し、交通渋滞の緩和や化石燃料の保存、大気汚染の緩和など様々なメリットを社会にもたらすことが期待されている。しかしながら、現在の社会においてカーシェアリングは広く利用されている交通手段とは言い難いのが現状である。

交通市場を対象とした研究は主に社会に起こってい

る現象全体を表現する現象記述的な研究と、本質のみを対象としてメカニズムを分析する理論的な研究の二種類である。そのうち、カーシェアリングの市場を対象にした研究の多くは人々のカーシェアリングの利用要因を対象とした現象記述的な研究である。カーシェアリングの市場構造に着目し、市場形成のメカニズムを分析することを目的とした理論モデルによる研究はほとんど採用されていない。しかしながら、カーシェアリングの市場の問題点を解決するうえで、市場の構造とそれに影響を与える要因を理解する必要がある。

本研究ではカーシェアリングが社会全体の自動車台数に与える影響を分析する。その方法として、カーシェアリングの市場を構成する主体の行動のモデルを構築し、カーシェアリングの市場の構造とその市場の構造を決定する要因に着目しながら市場が形成される過程およびそのメカニズムを分析する。

以下、**2.**では、従来の既往研究と本研究の立場について言及する。**3.**では、本研究で用いるモデルの定式化を行う。**4.**では、構築したモデルを用いて市場均衡の分析を行う。また、分析した市場の構造を下にカーシェアリングの市場が社会に与える影響についても分析を行う。**5.**では、本研究のまとめを行い今後の課題を提示する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) カーシェアリングの普及と要因と効果

人々が交通手段を選択する要因として、利用料金などの金銭的費用、OD間の移動時間、予定の変化に対応できる柔軟性、乗車地・降車地などの自由度などの利便性などが挙げられる。これらの要因を考慮して人々は状況に応じて交通手段を選択する^{1),2)}。ここでは、カーシェアリングと他の交通手段の違いを考える。

はじめに、金銭的費用の面を考える。自動車は一人ないし少数の間人によって使用されるモビリティである。そのためバスや電車などの多数の人々と共同で使用するサービスと比較して利用者の一人当たりの金銭的負担は大きいものとなる。カーシェアリングは自身が車を使用していない間他人がその車を使用しているため、一人当たりの金銭的負担は一人で自動車を所有する場合に比べて通常は小さくなる。

次に、取引費用の面を考える。取引費用とは、ここではサービスが提供されているスポットまでの移動時間やサービスを受けるための待ち時間など、サービスを取引するまでにかかる時間的費用のことを指す。車を所有する場合は、通常所有している車は自身の近辺に駐車しており、他の利用者も存在しないため取引費用は限りなく0に近い値をとる。公共交通機関やカーシェアリングではサービスが受けられる場所まで移動しなければならずその移動時間は居住地区によって大きく変動する。待ち時間に関しては様々な場合が考えられる。バスや電車にはダイヤが設定されており、待ち時間は容易に予想できるものである。タクシーはタクシースポットにおいて利用者とタクシーが共に待ち行列に並ぶ二重待ち行列が発生することが特徴である。カーシェアリングでは利用できる車がない場合に限り利用者には利用可能な車が現れるまで待ち時間が発生するという特徴がある。利用者が増加すればより待ち時間は増加し、車の台数が増加すれば待ち時間が減少する。これらの相互作用によって待ち時間という取引費用は決定される。このような待ち時間が発生する交通手段では取引費用は状況によって変化する。

ここで、カーシェアリング市場の形成効果について考える。個人で保有されている自家用車の多くは利用されていない時間が長い状況にある。その人々がカーシェアリングに移行した場合には、車一台あたりの利用時間は増加し自動車台数は減少することが考えられる。一方で、カーシェアリング市場が形成されている状態においてサービスの改善など何らかの要因でカーシェアサービスに対する需要が増加したとしよう。その場合、サービスの提供者は需要の増加による混雑を解消するためよりサービスの規模を大きくすることが

考えられる。このとき、カーシェアサービスの消費者の需要はサービスの規模増加による効率化に伴いさらに増加し、カーシェアサービスを利用していなかった人々もカーシェアリングを利用するようになる可能性がある。このように、カーシェアリング市場が形成されることによりこれまで社会に顕在化していなかった自動車需要が現れる可能性があり、結果として自動車台数が増加する可能性も考えられる。これらのことから、カーシェアリング市場と自動車台数の関係は複雑であることが分かる。そして両者の関係を複雑にしている原因は取引費用であると考えられる。**2.(2)**において、この取引費用の性質が市場に与える影響に関して考察を行う。

(2) 取引費用に伴う規模の経済

カーシェアリングの市場にはカーシェアサービスを提供する企業と交通行動を行う人々の二種類の主体が存在する。各主体がそれぞれ戦略的な行動をとった場合、市場には外部経済が生じる可能性がある。外部経済が働く市場では複数の均衡解が生じることが知られている³⁾。カーシェアリングの市場においては待ち時間という取引費用による外部経済性が考えられる。カーシェアの利用者が増加し、それに伴い企業がスポットに車を置く台数を増加させれば、カーシェアを行う際にかかる取引費用は減少し取引が効率化される。このように、カーシェアの利用者数とスポットに置かれる車の台数が共に増加した場合、取引費用の減少をもたらすという規模の経済性が存在することが考えられる。**3.(5)**にて取引費用に伴う規模の経済性を本研究で使用するモデルの下で証明する。

(3) 関連する既往研究

カーシェアリングをの選択要因に関する研究例として、石村等は⁴⁾カーシェアの金銭的負担に焦点を当てた実証研究を、田口等は⁵⁾カーシェアスポットまでの徒歩移動許容時間に焦点を当てた実証研究を行っている。その他の観点として、太田等⁶⁾は環境問題への関心などの人々の心理的要因に着目した実証研究を行っている。これらの研究はある地域のみを対象としているが、いずれの要因もカーシェア利用意向に大きな影響があることを示しており、自動車数削減の可能性があると示している。このように、交通手段の選択の際に基準となるそれぞれの要因に着目した研究例は数多く存在する。しかしながら、カーシェアを行う際に発生し得る待ち時間に焦点を当てた研究は筆者の知る限りでは存在しない。この理由として、待ち時間は利用者の人数やカーシェアスポットに存在する車の台数により逐一変化するものであるため、他の要因と違い

アンケート調査等を用いて実証的に分析することが難しいためであると考えられる。

本研究と同様に、交通行動の取引費用による外部性に焦点を当てた研究例として、松島等は⁷⁾ タクシーとその利用者のサービススポットの市場に存在する待ち時間という取引費用に着目している。双方の需要の増加が期待待ち時間を減少させる規模の経済が働くことにより、一方の需要の増加が他方の需要の増加を招くという金銭的外部経済が発生し、双方に有利な市場を形成する市場圧の経済が働くことを理論的に示している。

(4) 本研究の目的と分析の方針

カーシェアリングを対象とした多くの研究は、現在起きている現象の下で個人の意思決定に着目しその要因を分析し社会的に最善となるような改善策を提示することを目的としている。カーシェアリングの市場構造に着目し、市場が形成されるメカニズムおよび市場の特徴に焦点を当てて分析を行った研究事例は極めて少ない。しかしながら、カーシェアリングの市場構造の本質を理解することは、カーシェアリングに関する諸問題への分析だけでなく、その先の目標であるカーシェアリング市場が形成されることによって生じる自動車数削減可能性および環境問題への影響を分析する上でも非常に重要であると考えられる。

本研究では、カーシェアリングの様々な普及要因の中でも特に、カーシェアリングにおける待ち時間により発生する取引費用に着目する。取引費用に着目することで、これまであまり注目されてこなかったカーシェアリング市場が形成されるメカニズムを明らかにし、市場構造の本質を理解できると考える。この取引費用がサービスの利用者および提供者の行動に与える影響を理解することはカーシェアリング市場の普及やカーシェアリングが社会に与える効果を分析する上で重要であると考えられる。これらのことから本研究では、企業と個人の二つの経済主体の行動とそれによって現れる取引費用が持つ外部経済性によりカーシェアリングの市場がどのように形成され、またどういった特徴を持つのかを分析する。その分析結果の下、カーシェアリング市場が形成される過程において自動車の台数がどのように変化するかを分析する。

3. モデルの定式化

(1) モデルの前提条件

あるひとつの地域に N 人の個人が存在している状況を考える。カーシェアリングサービスを提供する企業はひとつのみであり独占市場を仮定する。その想定している地域のある一地点に企業がサービスを提供する

施設（以下カーシェアスポットと呼ぶ）を設置する。個人はその地点においてカーシェアリングサービスの取引を行うことができる。

企業が提供するサービスの内容はカーシェアスポットに使用可能な車を提供することと利用料金の設定を行うことである。利用料金および提供する車の台数は企業側が自由に設定できるものとする。

個人は、カーシェアスポットに車が存在する場合その車を任意の時間利用する。使用した車を元のカーシェアスポットに返却することでサービスは終了する。個人がサービスを利用する場合その利用時間に応じて利用料金を負担する。 N 人の個人ははじめに一人一台車を所有しており、ある一期間の間所有している車を放棄しカーシェアを行うか、車を保有し続けるかの意思決定を行う。カーシェアスポットに設置されている車がすべて利用中である場合、カーシェアの利用を意図した個人は他人のサービスが終了し使用可能な車が現れるまで待機する必要がある。個人は意思決定の際に他の交通手段は選択しないものとする。個人が意思決定を行う際には、カーシェアリングにおいて車を使用する効用、カーシェアサービスの利用料金である金銭的費用、待ち時間により生じる取引費用と、自身が保有する車を使用する効用、保有にかかる金銭的費用、待ち時間による取引費用を比較しより優れているほうを選択する。意思決定を行う際にカーシェアスポットへの移動時間に関する取引費用などの他の要因の存在も考えられるが、本モデルにおいては待ち時間による外部性をより明確に示すために考慮しないものとする。

個人が車を使用する頻度を平均 λ のポアソン分布、車の利用時間を平均利用時間 $\frac{1}{\mu}$ の指数分布に従うと仮定する。意思決定はある期間の最初に行い、その期間中は車の使用頻度や使用時間はそれぞれの平均値から変化しないものとする。個人は一回の車の使用で効用 u を得ることができるとする。効用 u はカーシェアスポットの車を使用する場合も自身が保有する車を使用する場合も同様の値をとると仮定する。

(2) 個人の行動モデル

はじめに、個人がカーシェアリングを行う際に得られる効用を定義する。個人がカーシェアリングを行う場合、使用料金などの金銭的費用と待ち時間による取引費用を負担する。ある期間での個人 i のカーシェアリングを行う場合の一期間中の効用を U_i として次式で定義する。

$$U_i = \lambda(u - \frac{c}{\mu} - kt) \quad (1)$$

式 (1) の右辺第一項は車の使用で得られる効用、第二項は車の使用料金、第三項は待ち時間による取引費用を

表している。ここで、 k は個人の時間価値の大きさを示すパラメータ、 t はカーシェアサービスを利用するにあたって必要な取引費用（待ち時間）であり、3.(2) でその期待値を具体的に導出する。

次に、個人が車を保有し続ける際に得られる効用を定義する。個人が車を保有する場合、金銭的費用として車を保有するための固定費用を負担する。ある期間での個人 i の車を保有する場合の一期間中の効用を V_i として次式で定義する。

$$V_i = \lambda u - x_h + \varepsilon_i \quad (2)$$

式 (2) の右辺第一項は車の使用に得られる効用であり、カーシェアリングを行う際と等しい。第二項の x_h は個人が車をある期間所有している場合の固定費用を示している。車を使用する際にかかるガソリン代などの可変的な諸費用に関してはここでは考えず、車一台の所有に対しかかる費用は一定とする。車を保有している場合車を使用する際に待ち時間は発生しないため取引費用は 0 である。第三項 ε_i は車を所有することで得られる効用を示している。 ε_i は個人によって異なる値をとり、ある確率分布に従っているとするとする。

意思決定において個人がカーシェアリングを選択する条件は、 $U_i > V_i$ である。よって、カーシェアリングを選択する確率は次式で表せる。

$$Pr[U_i > V_i] = Pr[x_h - \frac{\lambda}{\mu}c - \lambda kt > \varepsilon_i] \quad (3)$$

ここで、 ε_i が $[0, a]$ の連続一様分布に従っていると仮定する。個人の総数 N を用いると、カーシェアリングを選択する人数 n は次式で表される。

$$n = \frac{N}{a}(x_h - \frac{\lambda}{\mu}c - \lambda kt) \quad (4)$$

(3) 期待待ち時間の導出

個人がカーシェアリングを行う場合、使用する車の予約を行いカーシェアスポットまで移動するという 2 段階のプロセスを経て車を使用することができる。予約は瞬時に行われると仮定すると、カーシェアスポットに利用可能な車が存在する場合は車の利用を意図すると同時に車の使用が可能になる。しかし、カーシェアスポットに利用可能な車が存在しない場合は利用者は他の利用者が車を返却するまで待たなければならない。ここで、個人がカーシェアスポットに到着する到着率はある期間での車の使用頻度と等しいとし、平均到着率 λ のポアソン分布で表されるとしよう。カーシェアの利用時間は車の利用時間と等しく、平均利用時間 $\frac{1}{\mu}$ の指数分布に従う。平均到着率 λ と平均利用時間 $\frac{1}{\mu}$ は外生的に与えられており変化しないと仮定する。

待ち行列を用いて期待待ち時間を導出しよう。従来の待ち行列モデル⁸⁾では、窓口に客が集まる場合の客の到着率と窓口でのサービス時間を元に待ち行列のモ

デルを構築しているが、ここでは図 1 に示すように客の到着率を各個人のカーシェアスポットへの到着率の和、窓口でのサービス時間を車を利用する時間として置き換えることより同様の議論を行うことができると考える。

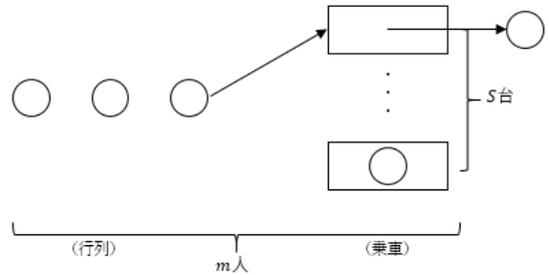


図-1 待ち行列モデル

ここで、各個人の到着率の和は、 n 人の利用者がいる場合にポアソン分布の再帰性により、平均到着率 $n\lambda$ のポアソン分布に従う。微小時間 Δt に 1 人到着する確率は、

$$p(1, \lambda \Delta t) \approx n\lambda \Delta t \quad (5)$$

サービス時間 s が t まで継続し、次の Δt の間に終了する確率は、

$$Pr(t \leq s \leq t + \Delta t | t \leq s) \approx \mu \Delta t \quad (6)$$

で表される。次に、時刻 t に m 人がサービスを利用中もしくは利用を待っている確率を $P_m(t)$ とすれば、系の状態方程式は、 $m = 0$ の場合、

$$P_0(t + \Delta t) = (1 - n\lambda \Delta t)P_0(t) + \mu \Delta t P_1(t) \quad (7)$$

$m < S$ の場合、

$$P_m(t + \Delta t) = (1 - (n\lambda + m\mu)\Delta t)P_m(t) + m\mu \Delta t P_{m+1}(t) + n\lambda \Delta t P_{m-1}(t) \quad (8)$$

$m \geq S$ の場合、

$$P_m(t + \Delta t) = (1 - (n\lambda + S\mu)\Delta t)P_m(t) + S\mu \Delta t P_{m+1}(t) + n\lambda \Delta t P_{m-1}(t) \quad (9)$$

で表される。(7)、式(8)、(9)の状態方程式の両辺を Δt で割り、 $\Delta t \rightarrow 0$ の極限を考えると、定常状態における状態方程式

$$-n\lambda P_0 + \mu P_1 = 0 \quad (10)$$

$$-(n\lambda + m\mu)P_m + m\mu P_{m+1} + n\lambda P_{m-1} = 0 \quad (11) \quad (m < S)$$

$$-(n\lambda + S\mu)P_m + S\mu P_{m+1} + n\lambda P_{m-1} = 0 \quad (12) \quad (m \geq S)$$

を得る。また、

$$\sum_{m=0}^{\infty} P_m = 0 \quad (13)$$

が成立する。式 (10), (12), (13) を逐次解くと、

$$P_m = \frac{S^m \rho^m}{m!} P_0 \quad (m < S) \quad (14)$$

$$P_m = \frac{S^S \rho^m}{S!} P_0 \quad (m \geq S) \quad (15)$$

となる。ただし、 $\rho = \frac{n\lambda}{S\mu}$ である。式 (14), (15) を条件式 (13) に代入することで

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{m=0}^{S-1} \left(\frac{S^m \rho^m}{m!} \right) + \frac{S^S \rho^S}{S!(1-\rho)}} \quad (16)$$

となる。以上より、サービスを利用中もしくは利用を待っている利用者 L およびサービスを待っている利用者 L_q は次のように求まる。

$$L = \frac{S^S \rho^{S+1}}{S!(1-\rho)^2} P_0 + \rho S \quad (17)$$

$$L_q = \frac{S^S \rho^{S+1}}{S!(1-\rho)^2} P_0 \quad (18)$$

リトルの公式を用いると、期待待ち時間 \bar{t} は次のように求めることができる。

$$\bar{t}(n, S) = \frac{1}{S\mu} \frac{S^S \rho^S}{S!(1-\rho)^2} \frac{1}{\sum_{m=0}^{S-1} \left(\frac{S^m \rho^m}{m!} \right) + \frac{S^S \rho^S}{S!(1-\rho)}} \quad (19)$$

よって、式 (1) における t の期待値を示すことができた。ただしこれらの議論は、 $0 < \rho < 1$ の範囲で成立するものであり、 $\rho \geq 1$ の場合には待ち行列は無限長に伸び待ち時間は無限大に発散する。よって、企業がサービスとして提供する車の台数の条件は次式で表される。

$$S > \frac{n\lambda}{\mu} \quad (20)$$

(4) 企業の行動モデル

独占企業を仮定する。企業は、サービスとして提供する車の台数 S と単位時間当たりの車の使用料金 c の値を式 (20) を満たす範囲で自由に決定することができ、その値を変化させることによって利潤の最大化を行うとする。企業が得られる利潤 Π は次式で表される。

$$\Pi(n, S, c) = \frac{\lambda}{\mu} nc - Sx_f \quad (21)$$

ここで、 $\frac{\lambda}{\mu} c$ は式 (1) で示した利用者一人当たりの利用料金である。よって、右辺第一項は利用者 n 人が負担する利用料金の総和であり車を S 台置いた場合に得られる収入を表している。 x_f は企業が一台車を所有する際にかかる固定費用であり、右辺第二項は車を S 台置く際にかかる固定費用を表している。 S を連続的な値であると仮定した場合、 S に関しての利潤最大化条件は次式で表される。

$$\frac{\partial \Pi(n, S, c)}{\partial S} = \frac{\partial n}{\partial S} \frac{\lambda}{\mu} c - x_f = 0 \quad (22)$$

また、 c に関する利潤最大化条件は次式で表される。

$$\frac{\partial \Pi(n, S, c)}{\partial c} = \frac{\partial n}{\partial c} \frac{\lambda}{\mu} c + n \frac{\lambda}{\mu} = 0 \quad (23)$$

これらのモデルにおける内生変数は n , S , c である。カーシェアスポット市場の均衡は式 (4), 式 (22), 式 (23) の 3 式によって決定される。

(5) 期待待ち時間の規模の経済性

期待待ち時間は、式 (19) で表されている。カーシェアリングの利用者数 n と企業がカーシェアスポットに置く車の台数 S が共に θ 倍 ($\theta > 1$) になった場合、

$$\bar{t}(\theta n, \theta S) = \frac{1}{\theta n \lambda} \frac{(\theta S)^{\theta S} \rho^{\theta S+1}}{(\theta S)!(1-\rho)^2} \frac{1}{\sum_{m=0}^{\theta S-1} \left(\frac{(\theta S)^m \rho^m}{m!} \right) + \frac{(\theta S)^{\theta S} \rho^{\theta S}}{(\theta S)!(1-\rho)}} \quad (24)$$

となる。ここで、 $t(n, S)$ と $t(\theta n, \theta S)$ の比を取ると

$$\frac{\bar{t}(\theta n, \theta S)}{\bar{t}(n, S)} = \frac{1}{\theta} \frac{\frac{(\theta S)!}{(\theta S)^{\theta S} \rho^{\theta S}} \sum_{m=0}^{\theta S-1} \left(\frac{(\theta S)^m \rho^m}{m!} \right) + \frac{1}{1-\rho}}{\frac{S!}{S^S \rho^S} \sum_{m=0}^{S-1} \left(\frac{S^m \rho^m}{m!} \right) + \frac{1}{1-\rho}} \quad (25)$$

ここで、式 (25) に近似式 $\sum_{m=0}^{S-1} \left(\frac{S^m \rho^m}{m!} \right) \approx e^{S\rho}$, スターリングの近似式 $S! \approx \sqrt{2\pi S} S^S e^{-S}$ を用いると

$$\frac{\bar{t}(\theta n, \theta S)}{\bar{t}(n, S)} \approx \frac{1}{\theta} \frac{\sqrt{2\pi S} \left(\frac{e^{\rho-1}}{\rho} \right)^S + \frac{1}{1-\rho}}{\sqrt{2\pi \theta S} \left(\frac{e^{\rho-1}}{\rho} \right)^{\theta S} + \frac{1}{1-\rho}} \quad (26)$$

ここで、 $\theta > 1$ より、

$$\sqrt{2\pi S} < \sqrt{2\pi \theta S} \quad (27)$$

また、 $0 < \rho < 1$ の範囲で、 $e^{\rho-1} > \rho$ であるため、

$$\left(\frac{e^{\rho-1}}{\rho} \right)^S < \left(\frac{e^{\rho-1}}{\rho} \right)^{\theta S} \quad (28)$$

よって、式 (26), (27), (28) より、

$$\bar{t}(\theta n, \theta S) < \bar{t}(n, S) \quad (29)$$

となる。式 (29) より、市場に参加する個人と車の台数がともに増加すると利用者の期待待ち時間は減少する。よって、市場に参入する個人、車の台数が共に増加すればするほど取引費用は減少するという規模の経済性が存在する。一方、 n および S の一方のパラメータを固定し、他方のパラメータを θ 倍 ($\theta > 1$) にした場合の期待待ち時間にはそれぞれ、

$$\bar{t}(\theta n, S) > \bar{t}(n, S) \quad (30)$$

$$\bar{t}(n, \theta S) < \bar{t}(n, S) \quad (31)$$

が成立する。すなわち、車の台数が増加すれば期待待ち時間は減少するが、利用客のみが増加する場合は平均待ち時間は増加し混雑現象が生じることが分かる。このように、カーシェアスポット市場の構造は取引費用の規模の経済性による外部経済と混雑による外部不経済の相互作用によって決定される。

4. 市場均衡の分析

(1) 市場均衡の分析

3.において、個人と企業という二つの主体の行動を定式化し、期待待ち時間の規模の経済性について示した。これらの主体それぞれが戦略的行動をとることによって、取引費用の規模の経済性により外部経済が生じる可能性がある。外部経済が働く市場においては、複数の市場均衡解が存在する可能性がある。この点に着目しながら市場均衡の分析を行う。

解析をするにあたって、簡単のために車を保有する場合の固定費用を $x_h = x_f = x$ 、待ち時間を $t = \bar{t}$ とする。はじめに、 S を固定した場合の c と n の関係について議論を行う。式 (4) を c について解くと、

$$c(n) = \frac{\mu}{\lambda}x - \frac{n}{\frac{\lambda N}{\mu a}} - \mu k \bar{t}(n) \quad (32)$$

となる。右辺第一項は定数である。右辺第二項は n に関して明らかに単調減少関数である。また、 $\bar{t}(n)$ において式 (30) が成立することより \bar{t} は n について単調増加関数であるため、右辺第 3 項は n について単調減少関数である。このことより、右辺は n に関して単調減少関数であり、ある n に関して $c(n)$ の値はひとつに定まる。式 (21) において、 S が固定されている場合、右辺第一項の $nc(n)$ のみが変化する。 $c(n)$ が n に関して単調減少関数であるため、 $nc(n)$ は上に凸である関数となる。これより、 S が固定されている場合、最適な n および $c(n)$ がただひとつに定まる。最適な n はパラメータ値によって変化する値であるが、ある一定数の利用客数が見込める場合には企業は c を増加させることによってさらに利潤が増加する。その結果、 n の値はある一定の値 n_{max} に収束する。

次に、 S を変化させた場合を考える。 S を増加させた場合、式 (31) に示すように待ち時間 $\bar{t}(S)$ は減少するため利用人数 n は増加し、式 (21) の右辺第一項である利益は増加する。しかしながら、式 (21) の右辺第二項である固定費用は増加する。このように、 S を変化させた場合には利潤の増加をもたらす効果と減少をもたらす効果が働いており、それらの相互作用によって市場が形成される。そのような市場においては複数の均衡解が存在する可能性が考えられる。市場の構造を決定するのは時間価値のパラメータ k などの市場環境パラメータである。これらの市場環境パラメータの影響を解析的に示すことは難しいため、次節において数値解析を用いることにより市場均衡への影響を分析する。

(2) 数値解析

数値解析を行うにあたってパラメータ値を設定する。それぞれのパラメータを $k = 1000000$, $\lambda = 0.2$, $\mu = 2$,

$N = 100$, $a = 100$, $x = 100$ とする。(以下 *Case1* と呼ぶ)

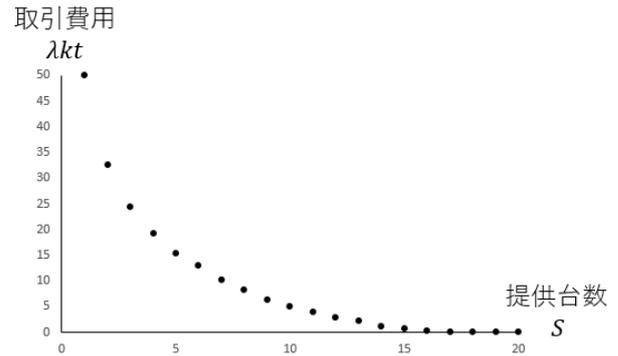


図-2 カーシェアスポットの車の台数と取引費用の関係

はじめに、取引費用と車の台数 S の関係を 図 2 に示す。取引費用は S が増加するにつれて 0 に収束する。取引費用は S が増加するにつれて 0 に収束する。この表からも取引費用とサービスとして提供される車の台数には規模の経済性が存在していることが読み取れる。これは言い換えると、企業が提供する台数を増加させた場合の取引費用の減少量は提供台数が多ければ多いほど小さくなり、企業がサービスを改善させるのにかかる費用に対して期待される利用者数の増加量は減少するということである。

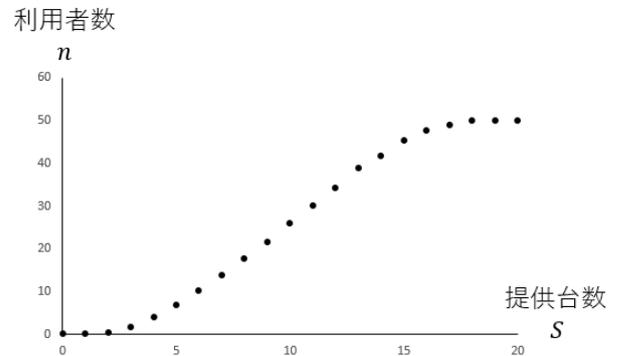


図-3 カーシェアスポットの車の台数と利用者数の関係

次に、車の提供台数 S を変化させた場合の n を示すグラフを 図 3 に示す。 S が小さい値の場合には取引費用が大きいため n の増加量は小さい。 S がある程度大きい値になると取引費用には規模の経済性により利用者数の増加量は大きくなる。しかしながら、 S の値がある一定値より大きくなるにつれて規模の経済が働いているにも関わらず利用者数 n も増加量が小さくなり、ある一定の値 n_{max} に収束する。この現象の理由は 図 2 に示したように、取引費用の規模の経済性から提供台数が多くなるにつれ企業がサービスを改善させるのにかかる費用に対して期待される利用者数の増加量は減少するためである。企業は利潤最大化行動をとるため、

過剰なサービスを提供した場合にはそれに対する収入を補うためにサービスの利用料金を増加させる。その結果、利用者数はある一定数に収束すると考えられる。これらの結果より、提供台数を増加させることが必ずしも企業の利潤の増加につながるとは限らず、規模の経済性により地域に存在する個人全員がカーシェアリングを行うとは限らないということが分かる。

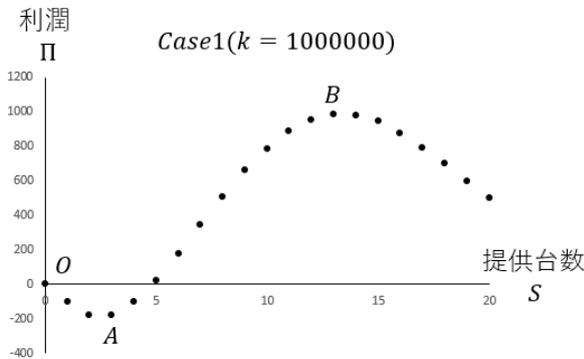


図-4 企業の利潤 (Case1)

図 4 は、Case1 における企業が提供する車の台数 S と企業が得る利潤 Π の関係を表した図である。点 A は極小点、点 O および点 B は極大点を示している。はじめに、初期状態において S が点 A での車の台数 S_A よりも大きく、 S_B よりも小さい場合を考える。この場合、企業が利潤を増加させるために S の値を増加させれば \bar{t} の値は減少するため待ち時間による取引費用は減少する。取引費用が減少すればカーシェアを行う期待人数が増加する。 S と n が共に増加する場合には待ち時間には規模の経済が働き取引費用がさらに減少する。その結果、さらに企業の利潤は増加し、最終的に車の台数は S_B まで増加する。次に、初期状態において S が S_B よりも大きい場合を考える。その場合、利用人数 n はこれ以上増えない値まで増加しており、 S が変化しても得られる利益はほぼ一定である。その状態においては企業は固定費用を減らすために S の値を減少させ、 S は S_B 間で減少する。最後に、初期状態において S が点 A での車の台数 S_A よりも小さい場合を考える。その場合、企業は利潤を増加させるために S の値を減少させれば \bar{t} の値は増加し取引費用の増加に伴い外部不経済が働き期待人数は減少し、企業が得る利益を減少させる。その結果、さらに企業は S を減少させ、最終的に $S_O = 0$ に収束する。そのような場合、カーシェアスポットの市場は成立しない。

次に、Case1 よりも個人の時間価値の大きさが小さい場合として、それぞれのパラメータを $k = 1000$, $\lambda = 0.2$, $\mu = 2$, $N = 100$, $a = 100$, $x = 100$ とする場合を考える。(以下 Case2 と呼ぶ)

図 5 は、Case2 における企業がカーシェアスポット

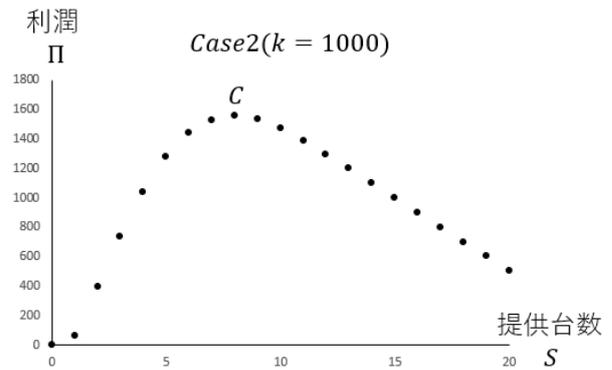


図-5 企業の利潤 (Case2)

に置く車の台数 S と企業が得る利潤 Π の関係を表した図である。点 C は極大点を示している。Case1 とは異なり、Case2 では極大点がひとつしか存在しないため、初期状態における S がどの値をとっても、Case1 において点 B に収束する場合と同様の効果が働き、点 C に収束する。よって、個人の時間価値が小さい場合にはカーシェアスポットの市場は必ず成立する。

これらの結果より、カーシェアスポットの市場には複数の均衡解が存在する場合としない場合が存在する。移動に対する時間価値が大きい人々は日々の移動時間を短縮させるため会社や学校など近くに居住する可能性が高い。そのような地域において、初期時点でカーシェアスポットに置かれる車の台数がある水準を超えていない場合は車の台数もカーシェアを利用する人数も共に 0 となり市場は消滅し、ある水準を超えている場合は市場が形成される。そのため、時間価値の大きい個人が居住する地域においてカーシェアスポットの市場を形成するためには、初期にある程度大きな投資が必要となる。また、移動に対する時間価値の小さい人々は、ベッドタウンのような日々の移動時間をある程度要する会社から離れた地域に居住する可能性が高い。そのような地域においてはカーシェアスポットの市場は車の台数の初期状態に依らず成立する。

(3) 自動車総台数に与える影響

個人がカーシェアリングを行うか車の保有を続けるかの意思決定を行う前の段階では、個人は一人一台車を保有しているため、個人の総数が N であるとき地域に存在している車の台数は N である。個人が意思決定を行った後に地域に存在する車の数 $F(n, S)$ は次式で表すことができる。

$$F(n, S) = N - n + S \quad (33)$$

図 4 における安定均衡解 O および B での地域の自動車台数は、 $F_O = 100$, $F_B = 74$ である。同様に、図 5 における安定均衡解 C での地域の自動車台数は、 $F_C = 49$ である。カーシェアリングの市場が形成され

た場合はされない場合と比較して自動車の総台数は減少すること、さらに個人の時間価値が小さい場合のほうが自動車台数は減少することが分かる。

ここで、他企業の参入や料金規制など何らかの要因によって利用料金 c が図 4 の点 B での利用料金 c_B より減少した場合を考えよう。式 (32) に示したように c について n は減少関数であるため、 c が減少した場合 n は増加する。 n が増加すれば企業は式 (22) に従って S を増加させ、取引費用に規模の経済が働く。その結果新しい均衡点に達する。新しい均衡点においては、自動車台数 F_B よりも小さい値となる。この例として、6.(2) において独占企業の行動により発生した厚生損失を是正するために料金規制を行う場合を考える。

(4) 厚生損失

市場の主体のひとつである企業は独占企業を仮定している。この場合、独占企業の利潤最大化行動によって厚生損失 WL が発生している可能性がある。この点に着目しながら、形成された市場均衡点と社会的最適な均衡点との違いに関して分析を行う。はじめに、社会的余剰 SW を次式で定義する。

$$SW = \Pi + nU_i + (N - n)V_i \quad (34)$$

式 (34) の右辺第一項は企業の利潤、右辺第二項はカーシェアを行う個人の効用の総和、第三項は車を保有し続ける個人の効用の総和を表している。以下、5. の Case1 でのパラメータ値を用いて数値解析を行う。なお、 $u = 500$ とする。

はじめに、企業が利潤最大化を行った場合の社会的余剰を考える。図 4 において、安定均衡解は点 O および点 B であり、それぞれの均衡解における総余剰を求める。いま、点 O の場合を考えよう。点 O ではカーシェアリングの市場は形成されない。そのため、式 (34) において、 $n_O = 0$ 、 $\Pi_O = 0$ であり、 $SW_O = NV_i = 0$ である。いま、点 B ($S_B = 13$) の場合を考えよう。点 B では企業が得られる利潤 Π が最大化されており、 $\Pi_B = 984$ である。そのときの企業の料金設定は $c_B = 590$ であり、総余剰は $SW_B = 6733$ である。

次に、社会的余剰の最大化が達成された場合の市場均衡解を求める。式 (34) を S および c について微分したものを次式に示す。

$$\frac{\partial SW}{\partial S} = \frac{\partial \Pi}{\partial S} + \frac{\partial n}{\partial S} U_i + n \frac{\partial U_i}{\partial S} - \frac{\partial n}{\partial S} V_i + (N - n) \frac{\partial V_i}{\partial S} = 0 \quad (35)$$

$$\frac{\partial SW}{\partial c} = \frac{\partial \Pi}{\partial c} + \frac{\partial n}{\partial c} U_i + n \frac{\partial U_i}{\partial c} - \frac{\partial n}{\partial c} V_i + (N - n) \frac{\partial V_i}{\partial c} = 0 \quad (36)$$

市場均衡解は式 (35) および、式 (36)、式 (4) の 3 式によって決定される。また、カーシェアリングの市場が形成されるための条件として、 $\Pi \geq 0$ を満たす必要がある。図 6 に車の台数と社会的余剰の関係を示す。

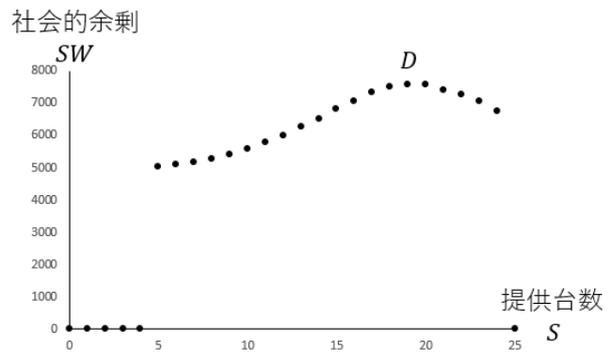


図-6 車の台数と社会的余剰の関係

サービスとして提供される車の台数が $1 \leq S \leq 4$ および $S \geq 25$ では企業の利潤が $\Pi < 0$ となるため、カーシェアリングの市場は形成されない。そのため、社会的余剰は $SW = -2000$ となる。 $5 \leq S \leq 24$ の範囲においてのみカーシェアリングの市場が形成される。図 6 の点 D は社会的余剰が $SW_D = 7587$ で最大となる点であり、点 D でのサービスとして提供される車の台数は $S_D = 19$ 、利用料金は $c_D = 270$ である。このことから、カーシェアリングの市場における独占企業の行動は厚生損失を $WL = SW_D - SW_B = 854$ だけ発生させており、資源配分に歪みが生じていることが分かる。

ここで、資源配分の歪みを是正するために $c = 270$ に使用料金を規制する場合を考えよう。企業は $c = 270$ において、式 (4)、式 (22) を満たすように利潤最大化行動を取る。この場合における企業の利潤とサービスとして提供される車の台数の関係を図 7 に示す。

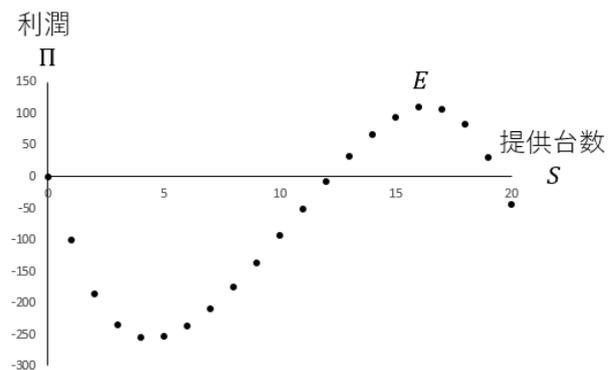


図-7 企業の利潤 ($c = 270$) の場合

$c = 270$ の場合においても 5. の Case1 の場合と同様に点 O および点 E の二つの均衡解が存在する。 $5 \leq S \leq 24$ の範囲においては均衡解は点 E に収束する。点 E でのサービスとして提供される車の台数は $S_E = 16$ であり、社会的余剰は $SW_E = 7113$ である。これらの結果から、 $c = 270$ に料金規制をすることによって厚生損失を $\Delta WL = SW_E - SW_B = 380$ だけ是正することができた。また、点 E における利用人数 $n_E = 63$ であり、

自動車台数は $F_E = 55$ となる。よって、 $F_E < F_B$ となり料金規制によって自動車の台数は減少することが分かる。このように、市場の厚生損失を是正するために料金規制を行うことが利用人数の増加をもたらす、地域に存在する自動車の台数を減少させる。

自動車の総台数が減少することによって社会に与える影響は様々である。第一に、自動車の総台数が減少することによって、自動車の駐車に必要なスペースが減少し、そのスペースは他の利用目的のために有効活用できる。

第二に、個人が車の所有を放棄しカーシェアリングを行うことによって、日常的に発生する移動に常に車を使っていた人々は車が必要な場合にのみカーシェアリングを行い、その他の移動の場合には公共交通機関を利用するような行動の変化が考えられる。このような行動の変化が起こった場合車の使用頻度の平均値入が減少する可能性がある。また、利用時間に対して利用料金がかかるシステムにおいては、個人は車の利用時間を減らそうと行動することが考えられる。その場合、利用時間の平均値 μ^{-1} は減少する。使用頻度や利用時間が減少すれば社会の自動車への依存度は緩和され、道路に存在する車の数は減少し渋滞の緩和および排気ガスなどの減少など社会問題の解決につながると考えられる。

5. おわりに

本研究では、カーシェアスポットにおいて多数の利用者がサービスの取引を行うような市場では、サービスの取引に発生し得る期待待ち時間に関する規模の経済が働くことを示した。また、企業と個人が取る戦略的行動の結果生じる取引費用の外部経済性が市場の構造を決定することを示し、カーシェアリングの市場においても複数均衡解が生じる場合があることを明らかにした。そして、カーシェアリングの市場を形成するためには企業にはある程度大きな初期投資が必要であること、また最適な市場を形成するためには企業の料金設定に規制が必要であることを示した。そして、カーシェアリングの市場が自動車台数に与える影響に関して分析を行った。

本研究は今後様々な発展が可能である。第一に、複数のカーシェアリングスポットが形成される場合における市場均衡モデルを開発することである。複数のカーシェアリングスポットが存在する場合には、取引費用の規模の経済性によりひとつのスポットのみに利用客

と提供される車の数の増加が起こるという市場集中の可能性が考えられる。また、カーシェア市場に参入する企業が複数存在する場合には企業間で競争が生じ、効率的な市場が形成される可能性がある。このような場合における市場の構造について分析を行う必要がある。第二に、個人の意思決定の際に他の公共交通機関を選択できるモデルの開発である。公共交通機関とカーシェアリングの違いは種々存在するが、そのひとつとして待ち時間という取引費用の発生の方に大きな違いが存在する。公共交通機関の多くはダイヤが設定されており、利用者は取引費用を容易に想定することができる。カーシェアリングの利用では、待ち時間の想定は容易ではないが規模の経済性が存在する。公共交通手段からカーシェアリングに移行する人々の存在により自動車の需要は増加する可能性がある。自動車需要が増加すればカーシェアリングの市場が規模の経済により効率化し、さらに自動車需要が増加する場合は考えられる。これらの事象が社会に与える影響を分析することは重要であると考えられる。

参考文献

- 1) Masabumi Furuhata, Maged Dessouky, Fernando Ordóñez, Marc-Etienne Brunet, Xiaoqing Wang, Sven Koenig : Ridesharing: The state-of-the-art and future directions, *Transportation Research Part B* 57, pp.28-46, 2013
- 2) Nelson D. Chan, Susan A. Shaheen : Ridesharing in North America: Past, Present, and Future, *Transport Reviews*, Vol.32, No.1, pp.93-112, January 2012.
- 3) 松島格也 : 戦略的相補性と交通市場, *土木計画学研究・論文集*, Vol.21-1, pp.11-22, 2004.
- 4) 石村龍則, 倉内慎也, 萩尾龍彦 : 自動車保有・利用コストに着目した松山都市圏におけるカーシェアリングの潜在需要分析, *土木学会論文集 D3(土木計画学)*, Vol67, No.5(土木計画学研究・論文集第 28 巻), pp.665-671, 2011.
- 5) 田口秀男, 木村一裕, 日野智, 木内瞳 : 地方都市におけるカーシェアリング利用の影響要因と導入可能性に関する研究, (社)日本都市計画学会都市計画論文集, No.44-3, pp.517-522, 2009.
- 6) 太田裕之, 藤井聡, 遠藤弘太郎, 土居厚司 : 人々の心理的要因に着目したカーシェアリングの効果的な加入促進に対する研究, *土木計画学研究・論文集*, Vol.26, No.5, pp.941-946, 2009.
- 7) 松島格也, 小林潔司 : タクシー・サービスのスポット市場均衡に関する研究, *土木計画学研究・論文集*, No.16, pp.591-600, 1999.
- 8) 飯田恭敬, 岡田憲夫 : 土木計画システム分析-現象分析編-, 森島出版, pp.214-224, 1992
- 9) 小林潔司, 福山敬, 松島格也 : フェイス・トゥ・フェイスのコミュニケーション過程に関する理論的研究, *土木学会論文集*, No.590/IV-39, pp.11-22, 1998.4

(2019. 3. 8 受付)

THEORETICAL ANALYSIS ABOUT EFFECTS OF CAR SHARING
SERVICE DIFFUSION PROCESS ON THE NUMBER OF CARS IN THE
SOCIETY

Yuki TAKEUCHI, Kakuya MATSUSHIMA, and Kiyoshi KOBAYASHI

One of the difference between car sharing and other means of transportation is that the transaction cost (waiting time) generated when using the service is influenced by the number of provided cars by the company and the number of users of the service. This transaction cost seems to have a complicated influence on the formation of the market. First, in this paper, we show that economy of scale exists in this transaction cost. Next, we analyze the possibility that multiple equilibria exist in the market owing to the economy of the scale of the transaction cost when both the individual using the service and the company providing the service take a strategic action. Also, we analyze the influence of multiple equilibrium market on the number of cars and consider the influence on the number of cars which is a factor of social problem.